

Poglavlje 9

Indukovani prenaponi

9.1 Nastanak indukovanih prenapona

Indukovani prenaponi na faznim provodnicima elektroenergetskog voda su posledica atmosferskih pražnjenja u objekte ili zemlju u blizini voda. Ovaj tip prenapona ugrožava izolaciju vodova srednjeg i niskog napona. Amplituda indukovanih prenapona je uvek znatno niža od podnosivih napona izolacije mreža visokog napona (110 kV i više).

Procena visine i talasnog oblika indukovanih atmosferskih prenapona je znatno složenija od analize prenapona pri direktnim atmosferskim pražnjenjima. Sve teorije koje tumače nastanak indukovanih atmosferskih prenapona na vodovima usled atmosferskih pražnjenja mogu se podeliti u sledeće grupe prema efektu koji se smatra dominantnim:

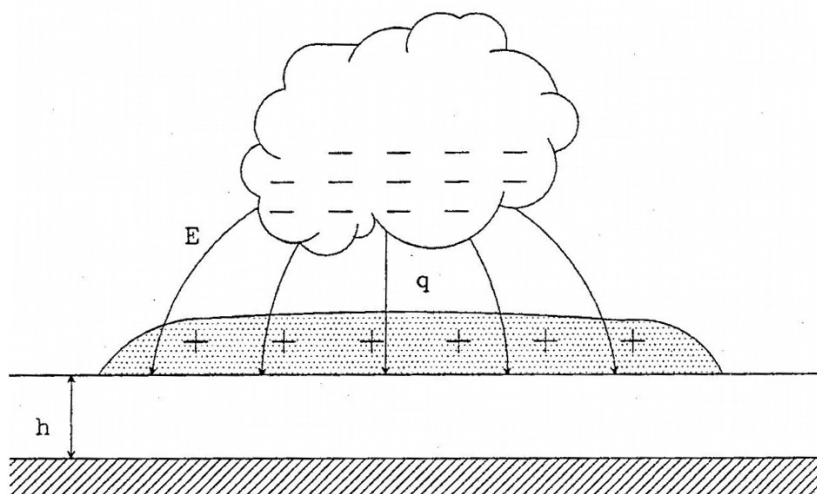
1. Elektrostatički uticaj oblaka
2. Elektrostatički uticaj skokovitog lidera
3. Magnetni uticaj glavnog udara
4. Elektromagnetni uticaj glavnog udara

Na ovom mestu će biti opisane samo teorije elektrostatičkog uticaja oblaka (koja je najstarija) i elektromagnetnog uticaja glavnog pražnjenja koja je najnovija i najkompletnija.

9.2 Elektrostatika teorija indukovanih prenapona

U [3] opisana je elektrostatika teorija nastanka indukovanih prenapona, na osnovu koje se mogu veoma jednostavno proceniti vrednosti putujućih prenaponskih talasa na faznim provodnicima nastalih nakon pražnjenja. Na slici 9.1 prikazan je naelektrisan grmljavinski oblak iznad nadzemnog voda visine h .

Usled dejstva električnog polja $\mathbf{E}$ izmedju oblaka i zemlje dolazi do indukovanja električnog naelektrisanja q suprotnog polariteta od naelektrisanja oblaka nad provodnicima voda. Pri tome se pretpostavlja da su fazni provodnici na neki način galvanski vezani za zemlju (preko mernih naponskih transformatora ili energetskih transformatora u postrojenjima na kraju voda ili preko nesavršene izolacije samog voda), što omogućava migraciju naelektrisanja. Na slici 9.1 prikazan je način formiranja indukovanih opterećenja na provodnicima voda usled dejstva oblaka.



Slika 9.1: Indukovano naelektrisanje na provodnicima voda usled elektrostatikog dejstva oblaka

Posle rasterećenja oblaka usled pražnjenja u zemlju ili izmedju oblaka električna opterećenja nisu više vezana elektrostatikom indukcijom. Potencijal provodnika na visini h iznad zemlje usled postojanja naelektrisanja dejstvom vektora električnog polja $\mathbf{E}$ iznosi:

$$\varphi = \mathbf{E}h \quad (9.1)$$

Očigledno je da potencijal faznog provodnika u odnosu na zemlju zavisi od jačine električnog polja $\mathbf{E}$ i visine provodnika h iznad zemlje.

Indukovani napon na provodniku voda se može razložiti na dva putujuća talasa koja se prostiru u direktnom i inverznom smeru duž voda. Amplituda oba putujuća talasa je identična i jednaka polovini amplitude indukovano prenapona φ , odnosno:

$$U_d(v_o t - x) = U_i(v_o t + x) = 0.5 h E \quad (9.2)$$

gde su:

$U_d(v_o t - x)$ —direktni talas koji se prostire ka kraju voda brzinom v_o ,

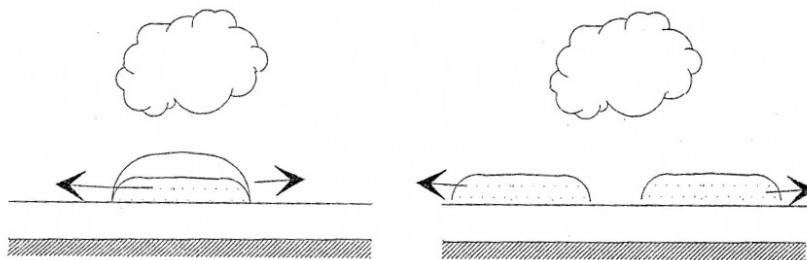
$U_i(v_o t + x)$ —inverzni talas koji se prostire ka početku voda brzinom v_o ,

v_o —brzina svetlosti,

x — posmatrano mesto na vodu,

t —posmatrani vremenski trenutak.

Na slici 9.2 prikazana je raspodela naelektrisanja nakon rasterećenja oblaka u dva različita vremenska trenutka.



Slika 9.2: *

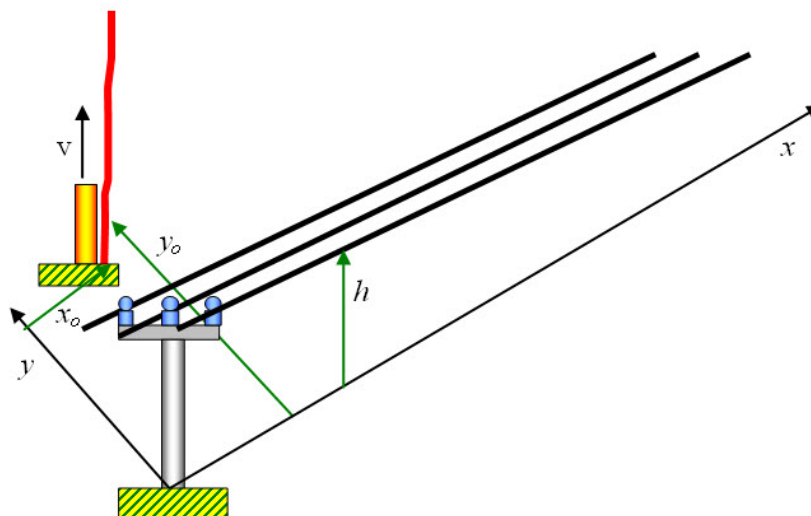
Ukupni potencijal provodnika u odnosu na zemlju dat je zbirom direktnog i inverznog talasa, kao na slici, odnosno:

$$\varphi(x, t) = U_d(v_o t - x) + U_i(v_o t + x) \quad (9.3)$$

Putujući talasi nastali oslobađanjem indukovanih naelektrisanja se prostiru duž voda, izazivajući naprezanje izolacije, koje može da izazove preskok ako je amplituda talasa veća od podnosivog napona izolacije.

9.3 Elektromagnetna teorija indukovanih prenapona

Za procenu amplitude i oblika indukovanih prenapona na osnovu elektromagnetne teorije uticaja glavnog udara uvode se odredjene pretpostavke prema modelu prikazanom na slici 9.3.



Slika 9.3: Pojednostavljeni model za proučavanje indukovanih prenapona

Oznake na slici 9.3 imaju sledeće značenje:

y_o – najkraće rastojanje od mesta udara groma do faznog provodnika,

h – srednja visina faznog provodnika,

I – amplituda struje glavnog udara,

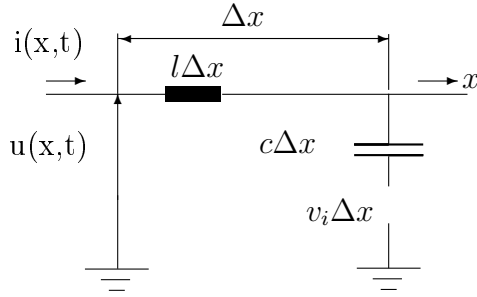
v – brzina prostiranja naelektrisanja povratnog udara.

Pretpostavke u ovom modelu su sledeće:

- Kanal groma je vertikaln,
- strujni talas se kreće naviše brzinom v manjom od brzine svetlosti (odnos $\beta = v/v_o < 1$, gde je v_o brzina svetlosti),
- smatra se da je zemlja homogena idealno provodna sredina,
- amplituda struje groma se usvaja da je jednaka dvostrukoj vrednosti amplitude upadnog talasa zbog refleksije od idealno provodne zemlje,

- gubici na vodu se zanemaruju,
- fazni radni napon se zanemaruje u odnosu na indukovane prenapone.

U modelu se pretpostavlja da su sva tri fazna provodnika dovoljno blizu da se na njima indukuju identični prenaponi, pa se svi provodnici zamenjuju jednim na visini h i rastojanju y_o od mesta udara. Vod se može podeliti na elementarne segmente, čija je zamenska šema data na slici 9.4 prema [100].



Slika 9.4: Elementarna deonica voda na kojoj postoji indukujući napon

Na slici 9.4 izvor čija je elektromotorna sila v_i predstavlja indukujući napon na vodu usled dejstva atmosferskog pražnjenja. Prema zamenskoj šemi na slici 9.4 se mogu napisati parcijalne diferencijalne jednačine sa pobudom, sledećeg oblika:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x = l \frac{\partial i}{\partial t} \Delta x \quad (9.4)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = c \frac{\partial (u - v_i)}{\partial t} \Delta x \quad (9.5)$$

gde su:

u –indukovani napon na vodu,

i –indukovana struja,

v_i –indukujući (pobudjujući) napon usled elektromagnetskog dejstva atmosferskog pražnjenja,

l –podužna induktivnost voda,

c –podužna kapacitivnost voda.

U parcijalnim diferencijalnim jednačinama je zanemaren uticaj otpornosti i odvodnosti voda, jer se vod smatra idealnim.

Eliminisanjem struje i iz sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina 9.4 i 9.5 dobija se jedna parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda sledećeg oblika:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 v_i}{\partial t^2} \quad (9.6)$$

Član na desnoj strani predstavlja indukujući napon koji nastaje zbog delovanja atmosferskog pražnjenja u blizinu voda. Ukoliko se pretpostavi da strujni talas atmosferskog pražnjenja ima oblik odskočne funkcije, tada se indukujući napon može izraziti u sledećem obliku:

$$v_i = -\frac{60I_o h}{\beta} \left[\frac{1 - \beta^2}{\sqrt{(\beta v_o t)^2 + (1 - \beta^2)r^2}} - \frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - t_o) \quad (9.7)$$

gde su:

I_o –amplituda struje pražnjenja,

h –visina faznog provodnika iznad zemlje,

$\beta = v/v_o$, odnos brzine prostiranja glavnog pražnjenja od zemlje ka oblaku i brzine svetlosti, koji se kreće od 0,1–0,5.

$r = \sqrt{x^2 + y_o^2}$ – udaljenost posmatrane tačke x na vodu od mesta udara,

h_c –srednja visina oblaka,

$t_o = r/v_o$ –trenutak kada se indukovani prenapon prvi put pojavljuje na mestu x na vodu.

Diferencijalna jednačina 9.6 se može rešavati analitički ili numerički.

9.3.1 Analitičko računanje indukovanih prenapona

Analitičko rešavanje diferencijalne jednačine 9.6 prikazano je u [82],[97],[98]. U slučaju odskočne funkcije struje, prema [82] dobija se sledeća vremenska promena napona na mestu x na vodu:

$$u(x, t) = (u_{11} + u_{12} + u_{21} + u_{22})h(t - t_o) \quad (9.8)$$

gde su:

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= \frac{30I_o h(1 - \beta^2)}{\beta^2(v_o t - x)^2 + y_o^2} \left[\beta(v_o t - x) + \frac{(v_o t - x)x - y_o^2}{\sqrt{(v_o t)^2 + \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}(x^2 + y_o^2)}} \right] \\
 u_{12} &= -\frac{30I_o h}{\beta} \left(1 - \frac{1}{1 + k^2} - \beta^2\right) \frac{1}{v_o t - x} \\
 u_{21} &= \frac{30I_o h}{\beta^2(v_o t + x)^2 + y_o^2} \left[\beta(v_o t + x) - \frac{(v_o t + x)x + y_o^2}{\sqrt{(v_o t)^2 + \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}(x^2 + y_o^2)}} \right] \\
 u_{22} &= \frac{30I_o h}{\beta} \left(1 - \frac{1}{1 + k^2} - \beta^2\right) \frac{1}{v_o t + x} \\
 k &= \frac{h_c}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \\
 t_o &= \frac{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}}{v_o} \\
 x_o &= \frac{(v_o t - x)^2 - y_o^2}{2(v_o t - x)}
 \end{aligned} \tag{9.9}$$

$$\tag{9.10}$$

U slučaju struje proizvoljnog talasnog oblika $i(t)$ primenjuje se konvolucionni integral u sledećem obliku:

$$u_1(x, t) = i(0)u_o(x, t) + \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} i(t - \tau) u_o(\tau) d\tau \tag{9.11}$$

gde su:

$u_o(x, t)$ —odziv voda na mestu x usled indukovano prenapona nastalog atmsosferskim pražnjenjem sa strujom pravougaonog čela,

$u_1(x, t)$ —odziv voda na mestu x usled indukovano prenapona nastalog atmsosferskim pražnjenjem sa strujom proizvoljnog talasnog oblika $i(t)$.

Konvolucionni integral se može analitički rešiti za slučaj talasa linearno rastućeg čela. Posle izvršenog integraljenja dobija se sledeći analitički izraz za indukovani napon na vodu prema [98]:

$$u_1(x, t) = -\frac{30ah}{\beta v_o} \left[(1 - \beta^2)(s_{11} + s_{12} + s_{21} + s_{22}) + s_{13} + s_{23} \right] h(t - t_o) \tag{9.12}$$

gde su:

$$\begin{aligned}
s_{11} &= \ln(z_{11} + \sqrt{1 + z_{11}^2}) \\
z_{11}(x) &= \frac{x + \beta^2(v_o t - x)}{\sqrt{(1 - \beta^2)[y_o^2 + \beta^2(v_o t - x)^2]}} \\
s_{12} &= \ln(z_{12} + \sqrt{1 + z_{12}^2}) \\
z_{12}(x) &= -\frac{y_o^2 + (2\beta^2 - 1)(v_o t - x)^2}{2(v_o t - x)\sqrt{(1 - \beta^2)[y_o^2 + \beta^2(v_o t - x)^2]}} \\
s_{13} &= \ln(z_{13} + \sqrt{1 + z_{13}^2}) \\
z_{13}(x) &= \frac{y_o^2 - (v_o t - x)^2}{2(v_o t - x)\sqrt{y_o^2 + h_c^2}} \\
s_{21} &= \ln(z_{21} + \sqrt{1 + z_{21}^2}) \\
z_{21}(x) &= z_{11}(-x) \\
s_{22} &= \ln(z_{22} + \sqrt{1 + z_{22}^2}) \\
z_{22}(x) &= z_{12}(-x) \\
s_{23} &= \ln(z_{23} + \sqrt{1 + z_{23}^2}) \\
z_{23}(x) &= z_{13}(-x) \\
t_o &= \frac{\sqrt{x^2 + y_o^2}}{v_o}
\end{aligned} \tag{9.13}$$

$$\tag{9.14}$$

Oznake imaju sledeće značenje:

t_o – trenutak kada talas stiže u posmatranu tačku x voda,

a –strmina čela strujnog talasa u $kV/\mu s$.

Primenom izraza 9.13 može se odrediti talasni oblik indukovnog napona u proizvoljnoj tački x neograničeno dugog voda koji je na rastojanju y_o od mesta udara. Članovi s_{11} , s_{12} i s_{13} u kojima figuriše argument $(v_o t - x)$ predstavljaju komponente indukovnog napona koji se prostire u pravcu porasta x -koordinate. Članovi s_{21} , s_{22} i s_{23} u kojima figuriše argument $(v_o t + x)$ predstavljaju komponente indukovnog napona koji se prostire u pravcu smanjivanja x -koordinate.

Ova metoda se može primenjivati za talasne oblike struja atmosferskih pražnjenja proizvoljnog oblika. U tom slučaju se primenjuje princip superpozicije na više talasa različitih strmina čela, koji se pojavljuju u različitim trenucima.

9.4 Numeričko računanje indukovanih napona na vodu

Parcijalne diferencijalne jednačine 9.4 i 9.5 se mogu rešavati numeričkim putem, podelom voda na elementarne deonice čija je zamenska šema data na slici 9.4.

Ako se u izraze 9.4 i 9.5 zameni da je brzina prostiranja:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \text{ i } Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

tada se parcijalne diferencijalne jednačine mogu transformisati u sledeći oblik:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} Z \frac{\partial i}{\partial t} \quad (9.15)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o Z} \left[\frac{\partial(u - v_i)}{\partial t} \right] \quad (9.16)$$

Ako se napon i struja u tački x na vodu izraze preko direktnih, odnosno inverznih talasa:

$$u = u_d + u_i$$

$$i = \frac{u_d}{Z} - \frac{u_i}{Z}$$

tada se izrazi 9.15 i 9.16 mogu napisati u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_d}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} + \frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} \\ \frac{\partial u_d}{\partial x} - \frac{\partial u_i}{\partial x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} - \frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \end{aligned}$$

Gornji sistem jednačina se može rešiti sabiranjem, odnosno oduzimanjem, nakon čega se dobija:

$$-\frac{\partial u_d}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} + \frac{1}{2v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (9.17)$$

$$-\frac{\partial u_i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{2v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (9.18)$$

Analitičko rešenje parcijalnih diferencijalnih jednačina 9.17 i 9.18 predstavljaju dva putujuća talasa koji se prostiru duž voda u suprotnim smerovima. Vrednost napona pojedinih talasa se može izračunati metodom konačnih razlika, ako se izaberu ekvidistantne tačke po vremenskoj i prostornoj koordinati:

$$\begin{aligned} x_j &= x_o + j\Delta x \text{ za } j = 1, 2, \dots, J \\ t_k &= t_o + k\Delta t \text{ za } k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (9.19)$$

gde je J ukupan broj tačaka na vodu, a K broj vremenskih trenutaka u kojima se naponi računaju.

Parcijalni izvodi direktnog naponskog talasa u_d mogu se približno izraziti preko konačnih razlika:

$$\frac{\partial u_d}{\partial x}(j, k-1) = \frac{u_d(j, k-1) - u_d(j-1, k-1)}{\Delta x} \quad (9.20)$$

$$\frac{\partial u_d}{\partial t}(j, k-1) = \frac{u_d(j, k) - u_d(j, k-1)}{\Delta t} \quad (9.21)$$

Na isti način se izražavaju i parcijalni izvodi inverznog naponskog talasa u_i , vodeći računa jedino o suprotnom smeru prostiranja. Zbog toga koordinata $j+1$ predstavlja tačku iz prethodnog koraka proračuna.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x}(j, k-1) = \frac{u_i(j+1, k-1) - u_i(j, k-1)}{\Delta x} \quad (9.22)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}(j, k-1) = \frac{u_i(j, k) - u_i(j, k-1)}{\Delta t} \quad (9.23)$$

U prethodnim izrazima je usvojen sledeći skraćeni način obeležavanja napona u funkciji vremenske, odnosno prostorne koordinate:

$$\begin{aligned} u_d(x_j, t_k) &= u_d(j, k) \\ u_i(x_j, t_k) &= u_i(j, k) \end{aligned}$$

Ovakav način obeležavanja je pogodan za direktnu primenu pri numeričkom modelovanju pojava.

Posle zamene parcijalnih izvoda predstavljenih preko konačnih razlika u parcijalne diferencijalne jednačine 9.17 i 9.18, dobija se sledeći sistem jednačina:

$$\begin{aligned} \frac{u_d(j, k-1) - u_d(j-1, k-1)}{\Delta x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{u_d(j, k) - u_d(j, k-1)}{\Delta t} \\ + \frac{1}{2v_o} \frac{v_i(j, k) - v_i(j, k-1)}{\Delta t} \\ \frac{u_i(j, k-1) - u_i(j+1, k-1)}{\Delta x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{u_i(j, k) - u_i(j, k-1)}{\Delta t} \\ + \frac{1}{2v_o} \frac{v_i(j, k) - v_i(j, k-1)}{\Delta t} \end{aligned}$$

Ako se usvoji da prostorni korak Δx odgovara vremenskom koraku Δt , odnosno da za jedan vremenski korak talas predje jedan prostorni korak $\Delta x = \pm v_o \Delta t$ u direktnom,

odnosno inverznom smeru, tada se gornji sistem jednačina može napisati u jednostavnijoj formi:

$$u_d(j, k) = u_d(j - 1, k - 1) + \frac{1}{2} [v_i(j, k) - v_i(j, k - 1)] \quad (9.24)$$

$$u_i(j, k) = u_i(j + 1, k - 1) + \frac{1}{2} [v_i(j, k) - v_i(j, k - 1)] \quad (9.25)$$

U slučaju struje groma linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja se indukujući napon u funkciji vremena $V_i(t)$ može izračunati kao zbir dve komponente:

$$V_i = V_{i1} + V_{i2} \quad (9.26)$$

gde su:

- V_{i1} –komponenta usled dejstva čela talasa,
- V_{i2} –komponenta usled dejstva začelja talasa.

$$\begin{aligned} V_{i1} &= -\frac{60h_v}{\beta} s_1 \left[\frac{1 - \beta^2}{\beta v_o} \ln \frac{f(t)}{f(t_o)} - \frac{t - t_o}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - t_o) \\ V_{i2} &= -\frac{60h_v}{\beta} s_2 \left[\frac{1 - \beta^2}{\beta v_o} \ln \frac{f(t - T_f)}{f(t_o)} - \frac{t - T_f - t_o}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - T_f - t_o) \end{aligned} \quad (9.27)$$

Oznake u izrazu 9.27 imaju sledeće značenje:

$$f(t) = \beta v_o t + \sqrt{(\beta v_o t)^2 + (1 - \beta^2)r^2}$$

$s_1 = I_{max}/T_c$ – strmina čela struje,

$s_2 = I_{max}/(2T_z - T_c)$ – strmina začelja struje,

$r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}$ – udaljenost tačke na vodu date koordinatama (x, y) od udara groma sa koordinatama (x_o, y_o) ,

$\beta = v/v_o$ – odnos brzine povratnog udara i brzine svetlosti,

I_{max} – temena vrednost struje goma,

T_c – vreme čela talasa,

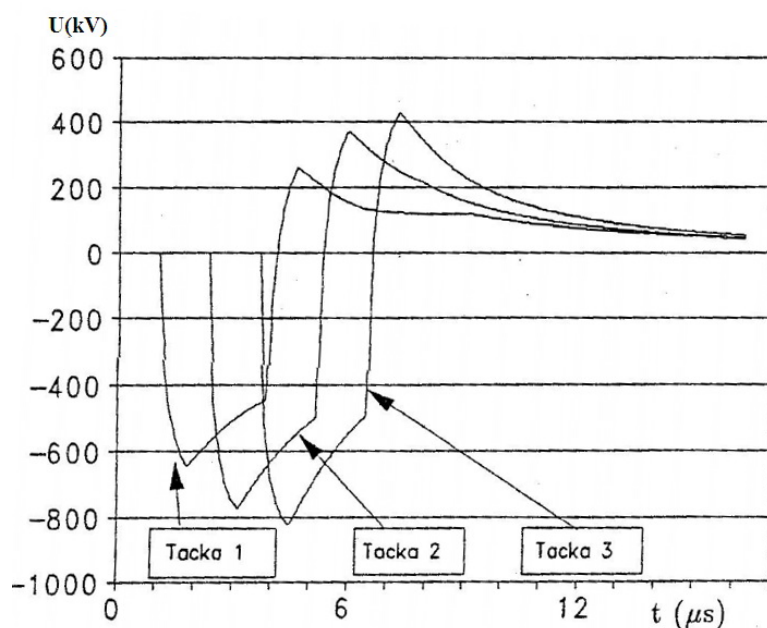
T_z – vreme začelja talasa,

h_c – visina oblaka,

h_v – visina provodnika voda.

Na početku i kraju voda treba definisati granične uslove. Granični uslovi na početku i kraju voda se definišu relacijom prelamanja talasa po diskretnoj metodi. Talasi indukovanih napona $U_d(j, k)$ i $U_i(j, k)$ koji se kreću ka početku, odnosno kraju voda tretiraju se kao upadni talasi za te tačke. Ukoliko su u graničnim tačkama vezani vodovi po kojima se ne vrši indukovanje prenapona, ili se nalaze drugi elementi koji se modeluju ekvivalentnim vodovima, tada se u graničnim tačkama vrši proračun napona uvažavajući indukovane talase kao upadne, kao i sve ostale talase koji dolaze u te granične tačke. Na taj način se može primeniti jedinstveni postupak za modelovanje indukovanih prenapona i procesa prostiranja talasa u složenoj mreži. Korak proračuna se i u ovom slučaju bira da bude manji ili jednak vremenu prostiranja po najkraćem vodu u sistemu.

Na slici 9.5 prikazan je talasni oblik napona na vodu čiji su provodnici visine 20 m iznad ravne površine tla. Udar groma se dogodio u zemlju na rastojanju 100 m od voda. Odnos brzine povratnog udara i brzine svetlosti je $\beta = 0,3$. Vod je tretiran kao beskonačno dugačak, a napon je računat u tački koja je na mestu najbliže tački udara (tačka 1), 200 m desno od te tačke (tačka 2) i 400 m desno od te tačke (tačka 3).



Slika 9.5: Talasni oblik indukovanih napona računat u tački 1 koja je najbliža mestu udara, tački 2 koja je 200 m udaljena i tački 3 koja je 400 m udaljena od mesta najbližeg tački udara

Može se uočiti da je indukovani talas napona bipolarnog karaktera, (u početnom periodu je negativan, a kasnije pozitivan), i da ima tendenciju porasta amplitude sa udaljavanjem od mesta udara. To je posledica superpozicije indukovanog talasa na mestu koje je bliže mestu udara koji se prostire po vodu, na koji se nadgrađuju talasi koji se indukuju u tačkama koje su dalje od mesta udara.

9.4.1 Procena visine indukovanih prenapona

Numerički proračuni daju talasni oblik prenapona, na osnovu koga se može detaljno sagledati ugroženost izolacije, vodeći računa o njenoj volt-sekundnoj karakteristici, prisustvu odvodnika prenapona, uticaja kapacitivnosti pojedine opreme itd. Medjutim, za grubu procenu maksimalne vrednosti indukovanih prenapona se može koristiti jednostavan empirijski izraz 9.28:

$$U_{Max} = k \frac{I_m h}{y_o} \quad (9.28)$$

gde su:

k —empirijski faktor koji ima vrednost od 30 do 60, s tim što se u našoj praksi koristi vrednost $k = 30$,

h —visina faznog provodnika (m),

y_o —udaljenost mesta udara groma od voda (m),

I_m —amplituda struje pražnjenja.

Gornji izraz može da posluži za grubu procenu prenapona, ali se može koristiti i za procenu godišnjeg broja ispada usled indukovanih prenapona, o čemu će kasnije biti više reči.

9.4.2 Procena uticaja zaštinog užeta

Eksperimentalno je utvrđeno da zaštino uže ima povoljan uticaj smanjujući indukovane prenapone na faznim provodnicima. Ovaj uticaj se obuhvata kroz empirijski koeficijent sprege izmedju faznog provodnika i uzemljenog provodnika. On ima vrednost 0.3 do 0.4 za srednjenaponske mreže i 0,6-0.9 za niskonaponske mreže sa uzemljenim neutralnim provodnikom na svakom stubu. Indukovan prenapon se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$U_{ind} = U_{ind_o}(1 - k_s) \quad (9.29)$$

gde je:

U_{ind} — indukovani prenapon na faznom provodniku kada se uvažava uticaj sprege,

U_{ind_o} — indukovani prenapon na faznom provodniku kada se ne uvažava uticaj sprege,

k_s – koeficijent sprege.

Kada su bliski fazni provodnik i uzemljeni provodnik, kao što je to slučaj kod niskonaponskih vodova sa uzemljenim neutralnim provodnikom na svakom stubu, indukovana struja u neutralnom provodniku gotovo potpuno poništava uticaj fluksa koji indukuje elektromotornu silu na faznom provodniku, pa se zato indukovani prenapon redukuje na veoma nisku vrednost.

9.5 Statistički proračun indukovanih prenapona

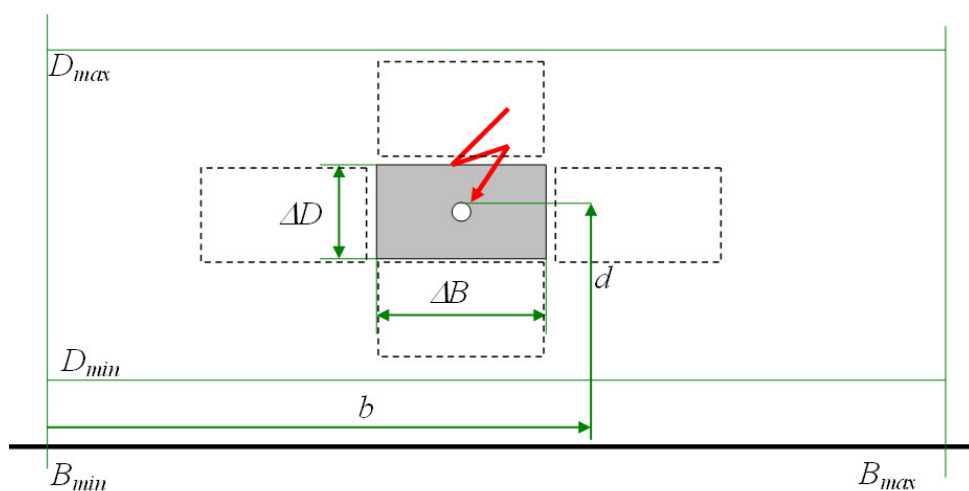
9.5.1 Metoda opasnih parametara

Proračun indukovanih prenapona je značajno dužeg trajanja od proračuna usled direktnih udara zbog numeričkog integraljenja po deonicama analiziranog voda. Za deterministički proračun to nije od velike važnosti, međutim kod statističkog proračuna produženje trajanja proračuna nije zanemarljivo. Stoga se preporučuje metoda opasnih parametara identična kao kod direktnih pražnjenja.

Strmina struje se varira od maksimalne strmine S_{max} postepeno je smanjujući za dekrement ΔS do vrednosti S_{min} . Ukupan broj simulacija za jednu tačku pražnjenja je:

$$N_S = \frac{S_{max} - S_{min}}{\Delta S} + 1 \quad (9.30)$$

Statistički proračun se obavlja za jednu tačku udara definisanu sa dve koordinate: uzdužna b i poprečna obeležena sa d . Ceo analizirani prostor se deli na pravougaonike u čijem centru se analizira atmosferski udar. Smatra se da svi udari unutar posmatranog pravougaonika izazivaju identičnu visinu prenapona. Lokacija atmosferskog udara se varira duž voda od koordinate B_{min} do B_{max} i na udaljenosti normalno na vod od D_{min} do D_{max} , kao na slici 9.6.



Slika 9.6: Variranje mesta udara duž voda i okomito na vod

Za svaku strminu struje se proračunava vrednost napona u tačkama registracije. Kada napon prevaziđe podnosivi napon u svim tačkama registracije, određuje se vrednost

struje koja izaziva preskok u svakoj od tačaka registracije, na isti način kao u slučaju direktnog pražnjenja u fazni provodnik, što je prikazano u poglavlju 8.1.1 na strani 309.

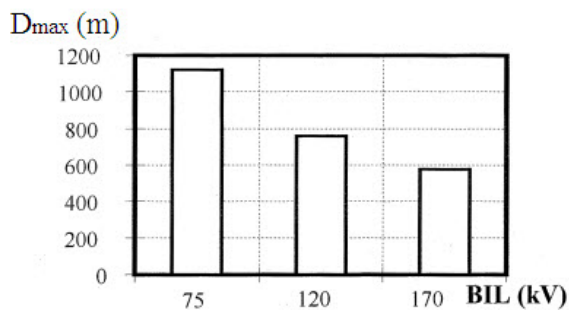
Trenutak preskoka na izolaciji se izračunava kada indukovani napon premaši podnosivi napon izolacije na osnovu nekog od modela za određivanje preskočnog napona.

9.5.2 Proračun godišnjeg broja preskoka

Metoda opasnih parametara atmosferskih pražnjenja se koristi za izračunavanje verovatnoće prevazilaženja parametara za udar unutar pravougaonika definisanog prema slici 9.6 određenom tačkom udara, u slučaju kada je čelo struje pražnjenja predstavljeno linearno rastućom funkcijom, dok prenapon na posmatranom objektu ne pređe podnosivi napon izolacije. Minimalna amplituda struje struje pražnjenja koja je dovoljna da izazove kvar izolacije može se izračunati kao proizvod vremena do preskoka i strmine čela struje. U slučaju indukovnog prenapona, isti princip se može primeniti tokom vremenskog intervala porasta struje koja izaziva indukovr prenapone [99].

Varijacija mesta atmosferskog udara okomito na vod se vrši od minimalne udaljenosti D_{min} . Zona bliža od D_{min} predstavlja atraktivnu zonu voda, koja se određuje prema sekciji 6.2.2 na strani 188, odnosno prema slici 6.5. Obično se usvaja da je $D_{min} = 3 \times H_{ef}$, gde je H_{ef} efektivna visina najvišeg faznog provodnika. Efektivna visina faznog provodnika računa se prema izrazu 8.91 na strni 348, Udaljenost D_{max} se usvaja tako da je verovatnoća preskoka i pri najkritičnijim parametrima atmosferskog pražnjenja (maksimalna strmina i amplituda struje) veoma mala.

Na slici 9.7 prikazana je maksimalna udaljenost D_{max} do koje indukovani prenaponi usled atmosfrski pražnjenja imaju uticaja, u funkciji podnosivog napona izolacije (BIL), odnosno odgovarajućeg radnog napona sistema.



Slika 9.7: Maksimalna zona uticaja indukovanih prenapona D_{max} u funkciji podnoivog atmosferskog prenapona BIL

Godišnji broj preskoka izolacije nadzemnih vodova izazvanih pražnjenjima u elementarne pravougaone površine na nivou tla dimenzija (izraženih u km) je gde je verovatnoća preskoka izolacije u slučaju pražnjenja groma u tačku u centru posmatrane elementarne pravougaone površine $A_{\Delta D \Delta B} = \Delta D \cdot \Delta D$ data je izrazom 9.31.

$$N_{\Delta D \Delta B} = N_g \cdot A_{\Delta D \Delta B} \cdot P_i \quad (9.31)$$

gde je:

N_G -godišnji broj udara groma po km^2 u ravnu površinu zemlje, odnosno godišnja gustina pražnjenja.

$A_{\Delta D \Delta B}$ -atraktivna površina posmatranog elementarnog pravougaonika sa koordinatom centralne tačke u koju se događa pražnjenje b i d .

$P_{b,d}$ -verovatnoća kvara izolacije (preskoka ili proboja) pri atmosferskom pražnjenju u tačku sa koordinatom $P_{b,d}$.

Ukupan broj kvarova izolacije dobija se kada se saberu brojevi kvarova kada se lokacija pražnjenja variraju duž ose paralelne vodu od B_{min} do B_{max} sa korakom Δb i po osi normalnoj na vod sa korakom Δd od D_{min} do D_{max} .

$$N_{ukup} = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_d} N_{\Delta D \Delta B} \quad (9.32)$$

Ukupan broj varijacija duž voda i normalno na vod se računa iz izraza:

$$\begin{aligned} n_b &= \frac{B_{max} - B_{min}}{\Delta b} \\ n_d &= \frac{D_{max} - D_{min}}{\Delta d} \end{aligned} \quad (9.33)$$

Broj varijacija strmine struje pražnjenja je obeležen oznakom n_s .

U tabeli 9.1 dat je optimalan broj varijacija duž voda n_b , okomito na vod n_d i broj varijacija strmina struje na čelu talasa n_s . Usvojene su referentne vrednosti broja varijacija, koji je dovoljno velik, da se mogu proračuni sa tim vrednostima smatrati tačnim. Zatim je variran broj varijanti tako da razlika u izračunatom broju ukupnih kvarova za usvojen referentni slučaj i optimalan broj bude manja od 5%, prema [99].

Optimalan ukupan broj varijacija prelaznih režima je 1176, za razliku od referentnog broja koji je 4000.

Veoma važan parametar pri statističkom pristupu proceni broja preskoka usled induktivnog delovanja struje atmosferskog pražnjenja je vremenski korak proračuna ΔT pri simulacije prelaznog procesa.

Tabela 9.1: Optimalan broj varijacija duž voda n_b , okomito na vod n_d i broj varijacija strmina struje na čelu talasa n_s

Oznaka	Referentna vrednost	Optimalna vrednost
n_b	10	7
n_b	20	14
n_s	20	12

Izvršene su analize osetljivosti izračunatog indukovanog prenapona za nadzemne vodove bez refleksije od krajeva (stavljani su otpornici čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi faznih provodnika) za različite dužine vodova ma kojima se događa indukovanje. Empirijska relacija za optimalni vremenski korak proračuna koja daje grešku izračunavanja manju od 5% u poređenju sa izračunatim prenaponom dobijenim sa vremenskim korakom od 10 ns izvedena je u sledećem obliku:

$$\Delta T = 0.1 \frac{D_{ind}}{c} \quad (9.34)$$

gde je:

D_{ind} -minimalna dužina voda na kome se javlja efekat indukcije (m),

c -brzina svetlosti (m/s).

Skraćivanje trajanja proračuna se može postići na taj način što se usvaja da minimalna strmina struje S_{min} ne bude strmina čela struje koja se pojavljuje sa verovatnoćom manjom od 5%, kao što je uobičajeno, već da to bude strmina struje koja može izazvati preskok na udaljenosti mesta udara D_{min} od analiziranog voda.